

# 基于分布估计算法的单路口交通信号控制<sup>①</sup>

张庆彬, 董文雷, 马伯元, 贺媛媛

(石家庄铁路职业技术学院 绿色智能工程技术中心, 石家庄 050061)

**摘要:** 针对遗传算法求解城市道路交叉口信号控制存在的主要问题, 以四相位交叉路口为研究对象, 建立了以信号周期内车辆延误总时间最短为目标函数, 以各相位有效绿灯时间为控制变量的单路口交通信号优化模型. 并分别以整数编码的 PBIL 算法和实数编码的 EMNA 算法两种典型分布估计算法求解单路口交通信号优化问题. 仿真结果表明, 与传统遗传算法相比, 两种分布估计算法均可用更小的种群规模快速高效地求得最优解.

**关键词:** 交叉口; 交通信号; 分布估计算法; 延误时间

## Estimation of Distribution Algorithm for Signal Timing Optimization of Isolated Intersection

ZHANG Qing-Bin, DONG Wen-Lei, MA Bo-Yuan, HE Yuan-Yuan

(Center of Green & Intelligent Engineering Technology, Shijiazhuang Institute of Railway Technology, Shijiazhuang 050061, China)

**Abstract:** Optimization the signal timing of the intersections is the key problem of the traffic signal control. For the purpose of reducing the traffic jam, optimization model for the four phases signal control of an isolated intersection is established, in which the total delay of vehicles is adopted as the objective function, and the effective green time in each phase as the control variables. Integer encoded PBIL algorithm and real number encoded EMNA algorithm are proposed to solve the traffic signal timing problem. The experimental results show that both the algorithms can get rational signal timing more effectively with less population size than that of the genetic algorithm.

**Key words:** intersection; traffic signal; estimation of distribution algorithm; total delay

道路交叉口是城市道路网的重要组成部分, 交叉路口的通行能力在很大程度上决定了整个路网的交通状况. 在城市中心道路无法扩建的情况下, 交叉口交通信号控制是保证交通畅通的重要措施. 交叉口交通信号控制包括单路口信号控制、干路信号控制(线控)和区域信号控制(面控)三个层次, 单路口交通信号控制既是城市交通信号控制的重要组成部分, 也是线控和面控的基础, 对其进行深入研究具有重要的现实意义<sup>[1,2]</sup>.

单路口交通信号控制的目的是通过优化交叉路口各相位的信号配时, 尽量减少车辆通过路口时间, 以达到疏散排队车辆, 减少交通拥堵和车辆延误, 保证城市道路畅通的目的. 由于城市交通系统具有明显的非线性、随机性和不确定性, 传统的数学方法很难

以找到全局最优解. 因此国内外学者一般采用智能优化算法解决交叉口信号控制问题.

杨祖元等采用动态调整交叉概率和变异概率的自适应遗传算法优化模糊控制器, 能有效减小交叉口车辆的平均延误, 提高交叉路口的通行能力<sup>[3]</sup>. 文献[4,5]利用实数编码、算术交叉和均匀变异遗传算法对信号配时的非线性规划模型进行优化, 仿真结果表明了算法的有效性. 刘脐锺等对遗传算法的交叉和变异过程进行改进, 以最小化车辆平均时延为目标, 对各个参数分别执行交叉和变异操作, 仿真结果表明可取得较好的优化效果<sup>[6]</sup>. 伍尚昆等采用一种基于多种群的改进蚁群算法对信号配时方案进行优化, 实验结果表明该算法能降低交叉路口的总延误时间和停车次数<sup>[7]</sup>. 尽管遗传算法在求解交通信号优化问题时可以取得较好

① 基金项目:河北省人才培养工程资助经费项目(2013-12);河北省高等学校科学技术研究青年基金(Q2012138)

收稿时间:2015-04-03;收到修改稿时间:2015-05-23

的优化效果,但其交叉算子和变异算子不具有学习和识别基因之间连锁关系的能力,算法易陷入早熟收敛或算法进展缓慢,而且其编码、选择、交叉以及变异算子的确定和各种参数的选取依赖于操作者的实际经验,如果没有针对待求解问题的先验知识,这些参数的选取就具有一定的盲目性,蚁群算法也存在类似问题。

分布估计算法是一类在概率模型和遗传算法基础上发展起来的新型进化优化算法,比传统的遗传算法具有更高的理论基础和进化导向性,能够取得比遗传算法更好的优化效果,因而在很多领域得到了应用<sup>[8]</sup>。

PBIL 算法<sup>[9]</sup>和 EMNA 算法<sup>[10]</sup>是两种典型的分布估计算法,PBIL 算法利用变量独立概率模型,EMNA 算法则假设各变量之间服从多变量正态分布,这两种算法具有结构简单、参数设置简便、优化效果好等优点。为此,本文分别采用整数编码的 PBIL 算法和实数编码的 EMNA 算法两种分布估计算法求解单路口的交通信号控制,以期提高信号控制的实时性和有效性。

## 1 单路口交通信号控制优化模型

城市道路交叉路口信号优化的性能指标主要有车辆延误、通行能力、停车次数、油耗、排队长度等<sup>[4]</sup>。其中车辆延误时间是使用频率最高的性能指标之一。在此指标下,信号配时的目标就是在一定的道路条件下,对配时参数进行优化,使得通过交叉口的全部车辆总延误时间最短。在计算时,延误时间通常采用 Webster 延误模型<sup>[11]</sup>:

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0.65\left(\frac{C}{q}\right)^{\frac{1}{3}}x^{(2+5\lambda)} \quad (1)$$

式(1)中  $d$  表示每辆车的平均延误(s),  $C$  为信号周期时长(s),  $\lambda$  表示绿信比,  $q$  为流量(pcu/h),  $x$  为交叉口饱和度。

Webster 延误模型中的第一项是由车辆均衡到达交叉口而引起的延误,称为均匀延误;第二项是由于车辆到达的随机性引起的延误,称为随机延误,式中的第三项数值很小,在实际计算时可忽略不计。

在城市交通干道上交叉路口一般采用四相位控制方式。对于一个典型的四相位交叉口,第一相位是东西方向直行和右转交通流通行,第二相位是东西方向左转交通流通行,第三相位是南北方向直行和右转交通流通行,第四相位是南北方向左转交通流通行,如图1所示。

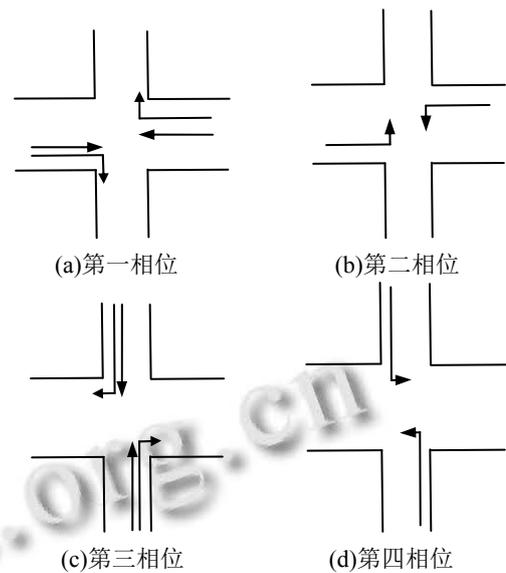


图1 四相位交叉口示意图

根据 Webster 模型,对于城市道路中的四相位平面交叉口,全部车辆总延误可表示为:

$$D = \sum_{i=1}^4 \sum_{j=1}^2 \left\{ \left[ \frac{C(1-\lambda_i)^2}{2(1-\lambda_i x_{ij})} + \frac{x_{ij}^2}{2q_{ij}(1-x_{ij})} \right] q_{ij} \right\} \quad (2)$$

式(2)中  $q_{ij}$  为第  $i$  相位第  $j$  进口道的车流量(pcu/h);  $x_{ij}$  为第  $i$  相位第  $j$  进口道上的车流饱和度;  $\lambda_i$  为第  $i$  相位绿信比。这样,四相位单路口交通信号优化的目标函数可定义为:

$$F = \min D \quad (3)$$

目标函数(3)是一个约束优化问题,各相位有效绿灯时间需满足以下约束条件:

1)信号周期总时间约束,对于四相位平面交叉口,各相位有效绿灯时间之和应满足:

$$t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = C - L \quad (4)$$

其中,  $t_1, t_2, t_3, t_4$  分别为各相位有效绿灯时间,  $L$  为总损失时间。

2)每相位最短绿灯时间,考虑交叉口行人和自行车过马路时的安全需要,每相位最短绿灯时间不得小于各相位最小绿灯时间  $t_{\min}$ ,因此每一相位的配时须满足条件:

$$t_{\min} \leq t_i \leq C - L - t_{\min} \times 3 \quad (5)$$

3)最大饱和度约束,合理的信号配时设计应能保证各相位的饱和度均不过大,避免造成交叉口道出现交通拥堵,即满足条件:

$$x = \frac{Cq}{sg_e} \leq x_{\max} \quad (6)$$

其中,  $g_e$  为有效绿灯时间,  $s$  为饱和度,  $x_{\max}$  为设定的

最大饱和度, 这样有:

$$t_i = g_{ei} \geq \frac{C y_{i\max}}{x_{\max}} \quad (7)$$

## 2 分布估计算法

### 2.1 分布估计算法运算流程

作为一类在遗传算法基础上发展起来的新型进化优化算法, 分布估计算法也采用了“选择+繁殖”的种群进化策略. 但在进化迭代过程中, 每一代新个体的产生方法与遗传算法不同: 首先根据被选择的优良解集构建表示种群联合概率分布的概率图模型, 然后采样概率图模型产生新的种群. 根据概率图模型种类的不同和采样方法的区别, 分布估计算法领域发展了很多种具体的实现方法<sup>[12]</sup>, 但其基本流程可以归纳如下:

- 1) 随机产生由  $M$  个个体构成的初始种群  $D_0$ ;
- 2) 在第  $l$  代, 计算种群  $D_l$  中  $M$  个个体的适应度, 如果满足停止条件, 算法结束, 否则继续进行;
- 3) 从种群  $D_l$  中选择  $N(N \leq M)$  个优良个体构成优良解集  $D_l^{se}$ ;
- 4) 由  $D_l^{se}$  构建概率图模型, 估计联合概率分布  $p_{l+1}(x)$ ;
- 5) 采样  $p_{l+1}(x)$  产生下一代种群  $D_{l+1}$ ,  $l \leftarrow l+1$ , 返回 2).

### 2.2 PBIL 算法

PBIL 算法是一种基于变量独立模型的离散编码分布估计算法. 基本 PBIL 算法采用了二进制编码. 在 PBIL 算法中, 第  $l$  代种群由一个  $n$  维概率向量  $p_l(x) = (p_l(x_1), p_l(x_2), \dots, p_l(x_n))$  表示. 其中,  $p_l(x_i)$  表示向量中第  $i$  个分量取 1 的概率, 也就是二进制表示的解集中第  $i$  位取 1 的概率.

PBIL 算法运行时, 初始概率向量  $p_0(x)$  的值为  $(0.5, 0.5, \dots, 0.5)$ . 在每一代, 利用  $p_l(x)$  产生  $M$  个个体, 然后从这  $M$  个个体中选择  $N(N \leq M)$  个最优解, 这  $N$  个最优解  $x'_{1:M}, \dots, x'_{l:M}, \dots, x'_{N:M}$  代表了种群的进化方向, 因此可由这  $N$  个最优个体产生新一代种群. 新种群产生的方法是更新概率向量:

$$p_{l+1}(x) = (1-a)p_l(x) + a \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x'_{k:M} \quad (8)$$

其中,  $a$  为学习率,  $a \in (0, 1]$ .

为了更有效求解各种组合优化问题, 可以将整数编码或排列编码引入 PBIL 算法. 在整数编码 PBIL 算

法中, 表示基因之间连锁关系以及种群进化方向的概率向量  $p_l(x)$  扩展为概率矩阵  $P$ . 设用长度为  $n$  的整数位串  $S$  来表示问题的解,  $S$  的第  $i$  个基因位置有  $m$  个取值, 则概率矩阵  $P$  的元素  $P_{ij}(1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq m)$  表示  $S$  的第  $i$  位取  $j$  值的概率<sup>[13]</sup>.

### 2.3 EMNA 算法

EMNA 是一种基于多变量高斯分布的实数编码分布估计算法, 算法首先随机产生  $M$  个个体构成初始种群  $D_0$ ; 在算法运行的每一代, 从  $D_l$  中选择  $N$  个优良个体组成训练数据集  $D_l^{se}$ ; 然后从选择的优良个体中估计多变量高斯分布函数:

$$f_{l+1}(x) = f_{l+1}(x | D_l^{se}) = N(x; \mu, \Sigma) \quad (9)$$

根据(9), 从  $f_{l+1}(x)$  中采样产生  $M$  个个体构成新种群  $D_{l+1}$ , 算法迭代进化直至满足停止条件. 研究表明, 基于多变量高斯分布的分布估计算法容易陷入搜索停滞和早熟收敛, 因此可采用方差扩展因子保持种群多样性, 扩大搜索范围<sup>[14]</sup>.

## 3 分布估计算法求解单路口交通信号控制

为了验证分布估计算法求解单路口交通信号控制问题的有效性, 本文分别采用整数编码的 PBIL 算法和实数编码的 EMNA 算法求解单路口的交通信号控制, 并与遗传算法的性能进行对比.

### 3.1 算例

某 4 相位平面交叉口, 其交通流数据如表 1 所示.

表 1 某路口交通流数据

相位	流量 $q$	饱和流量 $s$	流量比 $y$	$y_{i\max}$	
相位 1	东	400	2000	0.20	0.20
	西	240	2000	0.12	
相位 2	东	80	800	0.10	0.15
	西	120	800	0.15	
相位 3	南	270	1500	0.18	0.18
	北	240	1500	0.16	
相位 4	南	60	500	0.12	0.12
	北	60	500	0.12	

设信号周期为  $C=130s$ , 总损失时间  $L$  为  $10s$ , 各相位最小绿灯时间为  $10s$ , 最大饱和度为  $0.9$ . 若各相位黄灯时间和损失时间相等, 则有效绿灯时间即为实际的绿灯时间. 根据上表的交通量, 由最大饱和度限制得到各相位最短绿灯时间

$$g_{ei} \geq \frac{C y_{i\max}}{x_{\max}} = \frac{130 y_{i\max}}{0.90} \quad (10)$$

对于第一相位, 取较大的  $y$  值代入, 得  $g_{e1} \geq 29s$ , 同

样其它各相位取相应的流量比可以得到  $g_{e2} \geq 22s$ ,  $g_{e3} \geq 26s$ ,  $g_{e4} \geq 17s$ . 将上述数据代入, 可得

$$\begin{cases} 29 \leq t_1 \leq 55 \\ 22 \leq t_2 \leq 48 \\ 26 \leq t_3 \leq 52 \\ 17 \leq t_4 \leq 43 \end{cases} \quad (11)$$

### 3.2 基于分布估计算法的单路口交通信号控制

对四相位交叉口, 在周期固定且损失时间给定的前提下, 可以以第一、二、三相位的绿灯时间  $t_1, t_2, t_3$  作为优化变量, 第四相位的绿灯时间  $t_4 = C - t_1 - t_2 - t_3 - L$ .

PBIL 算法采用整数编码, 学习率  $a$  取 0.1, 种群规模  $M$  取 100, 优良个体  $N$  取  $0.1 * M$ . EMNA 算法采用实数编码, 种群规模  $M$  取 100, 优良个体  $N$  取  $0.5 * M$ , 方差扩展因子  $\beta$  为 1.75. 根据<sup>[5]</sup>, 遗传算法采用实数编码, 种群规模  $M$  取 300, 交叉概率 0.70, 变异概率 0.10. 不同算法运行的优化结果如表 2 所示.

表 2 三种算法的优化结果

算法	种群规模	总延误时间	运行代数	四相位有效绿灯时间
PBIL	100	59236	14	51, 22, 30, 17
EMNA	100	59236	34	50.64, 22.00, 30.36, 17.00
GA	300	59237	50	50.20, 22.00, 30.80, 17.00

由表 2 可见, 与遗传算法相比, 两种分布估计算法均能以更小的种群规模快速有效的求解单路口交通信号控制问题. 同时, 分布估计算法进化导向性好, 参数设置简便, 避免了遗传算法参数选择需要问题先验知识或多次试验的问题.

## 4 结语

信号配时优化是交通信号控制的关键问题, 直接影响着交叉路口的通行效率. 本文以信号周期内车辆总延误时间最短为目标, 分别采用整数编码的 PBIL 算法和实数编码的 EMNA 算法求解单路口四相位交通信号控制问题. 算例运行结果表明, 两种分布估计算法均能在较小种群规模下, 快速收敛取得最优解, 验证了分布估计算法的有效性.

### 参考文献

1 杨佩昆, 吴兵. 交通管理与控制(第 4 版). 北京: 人民交通出版社, 2009.

- 王秋平, 谭学龙, 张生瑞. 城市单点交叉口信号配时优化. 交通运输工程学报, 2006, 6(2): 60-64.
- 杨祖元, 黄席樾, 刘鸿飞, 杜长海. 基于改进遗传算法的交叉口模糊控制研究. 计算机应用研究, 2009, 26(9): 3330-3333.
- 杨建华. 遗传算法的改进及其在城市交通信号优化控制中的应用研究[学位论文]. 西安: 长安大学, 2007.
- Chen Qun. Research on Signal Control of Urban Intersection Based on Genetic Algorithms. Proc. of the Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. IEEE Press, 2009: 193-196.
- 刘脐锤, 李兵. 基于改进遗传算法的区域交通信号优化控制. 西华大学学报(自然科学版), 2014, 33(6): 48-52.
- 伍尚昆, 陈翠宜, 祝胜林. 基于多种群蚁群算法的交叉路口信号配时优化. 计算机应用与软件, 2014, 31(5): 83-87.
- Larranaga P, Lozano JA. Estimation of Distribution Algorithms: A New Tool for Evolutionary Computation. Kluwer Academic Publishers, 2002.
- Baluja S. Population-Based Incremental Learning: A Method for Integrating Genetic Search Based Function Optimization and Competitive Learning. Carnegie Mellon University, 1994
- Larranaga P, Etxeberria R, Lozano JA, Pena JM. Optimization in continuous domains by learning and simulation of gaussian networks. Workshop Program at the Genetic and Evolutionary Computation Conference - GECCO 2000: 201-204.
- Webster FV. Traffic signal settings. Road Research Laboratory Technical Paper, 1958, 39(1): 1-39.
- Shakya S, Santana R, eds. Markov Networks in Evolutionary Computation. Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K; 2012.
- Zhang QB, Cai MJ, Zhou FJ, Nie HR. An Improved PBIL Algorithm for Path Planning Problem of Mobile Robots. Lecture Notes In Computer Science, 2013(8206): 85-92.
- Santana R, Bielza C, Larrañaga P, Lozano JA, Echegoyen C, Mendiburu A, Armañanzas R, Shakya S. Mateda-2.0: A MATLAB package for the implementation and analysis of estimation of distribution algorithms. Journal of Statistical Software, 2010, 35(7): 1-30.